

1 利用地面观测评估 ERA5 云底高度产品

2 李丹，刘玉芝，邵天彬，罗润，谭子渊

3 半干旱气候变化教育部重点实验室，大气科学学院，兰州大学，兰州，730000

4 **摘要：**云底高度对天气预报和飞行保障有着重要作用，但目前十分缺乏高时空分辨率的云
5 底高度资料。本文利用中国东部地区云底高度的地面观测对 ERA5 再分析资料的云底高度进行评
6 估，基于地面观测和 ERA 云底高度的小时平均偏差对 ERA 进行了初步订正和验证，综合分析了
7 中国地区的云底高度分布特征。分析发现，ERA5 再分析数据中的云底高度比观测值整体偏低，
8 其中高估了低云的云底高度，低估了中、高云云底高度，且中、高云云底高度的偏差较大。另外，
9 在有降水的条件下，ERA5 数据中低云云底高度的准确性比无降水条件下的相对较高，但中、高
10 云云底高度的准确性却更低。综合地面观测和 ERA5 数据云底高度的日变化和月变化分析发现，
11 在我国东部地区，白天的云底高度整体低于夜间，峰值出现在夜间 22:00，谷值出现在上午 9:00，
12 秋季和冬季的 ERA5 云底高度月变化与地面观测资料较为一致。基于日变化分析获得的小时平均
13 偏差对 ERA5 数据的云底高度进行订正和验证，分析发现，2010-2019 年间，中国地区的云底高
14 度呈现自西北向东南逐渐降低的分布特征；中国南部、东北地区和青藏高原区域的云底高度相对
15 较低，其中，青藏高原夏季和秋季的云底高度较低，春季和冬季较高，而沙漠地区在四个季节的
16 云底高度都较高。

17 **关键字：**云底高度；分布特征；地面观测，ERA5 再分析数据¹

18 **文章编号：**2022109C

19 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2208.22109

20

21 **Assessment of Cloud Base Height Product**
22 **from ERA5 Reanalysis Using Ground-Based**
23 **Observations**

收稿日期：2022-09-07；网络预出版日期：

作者简介：李丹，女，硕士研究生，出生于 1999 年 4 月，主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: jid21@lzu.edu.cn

通讯作者：刘玉芝，E-mail: liuyzh@lzu.edu.cn

资助项目：国家自然科学基金面上项目（批准号：41991231）和中国科学院战略性先导科技专项（XDA2006010301）

Funded by: National Natural Science Foundation of China (Grant: 41991231) and Chinese Academy of Sciences Strategic Pioneer Science and Technology Project (Grant: XDA2006010301)

24 LI Dan, LIU Yuzhi, SHAO Tianbin, LUO Run, TAN Ziyuan

25 Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou
26 University, Lanzhou 730000

27 **Abstract:** Cloud base height (CBH) plays an important role in weather forecasting and flight
28 service. However, there is lacking in CBH data with high spatio-temporal resolution. This study
29 evaluates the CBH product of ERA5 reanalysis data using ground-based observations in eastern
30 China, revealing the CBH feature in China by validated CBH data from ERA reanalysis. Overall,
31 the CBH from ERA5 reanalysis data are lower than those from ground-based measurements, in
32 which the low-clouds and middle-clouds are overestimated and underestimated, respectively. In
33 addition, under precipitation condition, the CBHs from ERA5 data indicate a higher accuracy for
34 low clouds than those under non-precipitation synoptic background, while the accuracy of ERA5
35 CBH is lower for middle- and high-cloud. The result shows that the CBHs are lower in the
36 daytime than those at night, peaking at 9:00 and 22:00 over eastern China in the daytime and at
37 night, respectively. On the whole, the monthly mean CBHs from ERA5 reanalysis are consistent
38 with the ground-based measurements in autumn and winter. The revised CBHs of ERA5 data
39 present a gradually decrease from northwest to southeast of China during 2010-2019. Besides, the
40 CBHs over the southern China, northeastern China and Tibetan Plateau are relatively lower than
41 other areas. The CBHs show lower over the Tibetan Plateau in summer and autumn but higher in
42 spring and winter. Additionally, the desert region has higher CBH in all four seasons.

43 **Keywords:** Cloud base height, distribution characteristic, Ground-based observations, ERA5
44 reanalysis data

45 1 引言

46 云在地气系统辐射平衡和水循环过程中发挥着重要作用。一方面，云通过反射入射的短
47 波辐射对地表起冷却作用；另一方面，云能够通过捕获出射的长波辐射而起加热作用
48 (Ramanathan et al., 1989; Stephens et al., 2012; Zhou et al., 2016)。已有的研究发现，云对地
49 气系统辐射平衡的影响与云的垂直结构（包括云顶高度、云底高度、云厚度和云层数等）密
50 切相关(Mitchell and Finnegan, 2009; Zhang et al., 2017; Li et al., 2019)，而且云辐射强迫(CRF)
51 与云底高度密切相关。例如，Kato et al. (2011)指出，高估云分数和低估云底高度将导致
52 全球年平均的地表接收的瞬时向下长波辐射增加。Viúdez-Mora et al. (2015)利用云高仪测
53 量的云底高度通过辐射传输模型计算了云辐射强迫，发现，随着云底高度的降低，暖季和冷
54 季的地表平均CRF分别以 $4 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$ 和 $5 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$ 的速率减小。另外，云底高度也被作
55 为初始场用于改进数值天气预报和区域气候模式(Prein et al., 2015)，准确获取云底高度也
56 可为航空飞行安全提供保障(Ellrod and Gultepe, 2007)。因此，准确获取云底高度信息对
57

58 研究云辐射效应、提高数值天气预报准确性和保障飞行安全有着重要意义。
59 目前云底高度的观测主要包括地基观测和卫星遥感。基于云雷达、无线电探空和全天空
60 成像仪等地基观测可得到云的垂直结构特征 (Kassianov et al., 2005; Zhang et al., 2018; Zhang
61 et al., 2019; Cao et al., 2021)，获取的云底高度信息具有精度高、时间连续性好的优点，但
62 存在观测范围有限的缺陷。卫星遥感能够探测全球范围内的云顶高度、云顶温度、云水路径
63 和云底高度等信息 (Nazaryan et al., 2008; Pan et al., 2015)，但也存在缺陷，例如云卫星
64 (CloudSat) 和云气溶胶激光雷达和红外探路卫星观测 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared
65 Pathfinder Satellite Observation, CALIPSO) 可以很好地探测云底高度等云的垂直信息，但时
66 空分辨率较低。另外，也有研究通过其他方法获取云底高度的信息，例如利用云顶高度、云
67 顶气压和云层厚度计算云底高度 (Kuji and Nakajima, 2001; Hutchison et al., 2006; Welch et al.,
68 2008)，但也会由于云顶高度、云顶压力和云层厚度等参数的不确定性而导致计算结果有一
69 定误差 (Jiménez PA and McCandless, 2021)。总而言之，获取大范围云底高度观测的准确
70 信息仍存在很大困难。

71 另外，也有一些利用数值模式研究云底高度的工作 (Sharma et al., 2016; Kuhn et al.,
72 2018)。美国国家环境预报中心、欧洲中期天气预报中心和日本气象厅等基于大量观测资料，
73 通过同化数值模式结果、地面观测和卫星遥感等最新观测结果，形成了一些包含云信息的再
74 分析资料。然而，受观测站点覆盖范围及数值模式模拟性能的限制，这些再分析资料与实际
75 的大气状况仍有很大差异 (Ramon et al., 2019; Lei et al., 2020)。You et al. (2014) 指出，
76 NCEP/NCAR 和 ERA-40 分别低估和高估了青藏高原年平均和季节平均总云量；Miao et al.
77 (2020) 利用 CloudSat 和 CALIPSO 观测的云量评估了 ERA-Interim、JRA-55、MERRA-2
78 再分析产品，发现 ERA-Interim 和 JRA-55 对热带地区的低云刻画较好，但明显低估了高云；
79 而 MERRA-2 却能很好地表征高云，但却大大低估了低纬度地区的中、低云。因此，再分析
80 资料给出的云底高度仍有很大的不确定性，需要进行评估和订正。

81 基于 2016 年投入使用的综合预测系统 (Integrated Forecasting System, IFS) CY41R2，
82 利用四维变分同化技术，欧洲中期天气预报中心建立了 1979 年以来的新一代再分析数据
83 集 ERA5。该资料集拥有高时空分辨率的多种要素产品，云底高度产品是其中之一，但该数
84 据的准确性仍需利用观测的云底高度数据进行评估和验证。本文利用中国东部地区
85 2017-2019 年地面观测的小时云底高度资料，对 ERA5 再分析资料中的云底高度产品行了评
86 估，基于对该产品的初步订正，给出了中国地区云底高度分布特征，期望为 ERA5 云底高度
87 产品的不确定性提供参考依据。

88 2 资料和方法

89 2.1 资料

90 (1) K/LLX503 型激光雷达数据

91 K/LLX503 型激光雷达以 $1 \text{ kHz} \pm 15\%$ 的重复频率发射波长为 905 nm 、脉冲宽度为 45 ± 10

92 ns 的激光，通过对其后向散射回波的分析，获取水汽密度值，再通过水汽密度的变化率来
93 识别云（杨宁等，2009）。该雷达采用以云体为目标的激光测距技术，实现对云底高的准确
94 观测，具体技术参数、探测范围、角度和误差等信息在表 1 中给出。
95

表 1 激光雷达技术参数

Table 1 Technical parameters of the cloud Lidar

参数名称	参数值
激光器类型	InGaAs 半导体激光器
波长	$905 \pm 10 \text{ nm}$
单激光脉冲能量	$\leq 20 \mu\text{J}$
脉冲宽度	$45 \pm 10 \text{ ns}$
光束散角	$\leq 3 \text{ mrad}$
脉冲重复频率	$1 \text{ kHz} \pm 15\%$
光学系统有效径	102 nm
干涉滤光片	$910 \pm 15 \text{ nm}$
探测范围	20-7600 m
探测周期	30 s
空间分辨率	3.8 m
测量角度	仰角： $\pm 30^\circ$ ；方位角： $0-240^\circ$

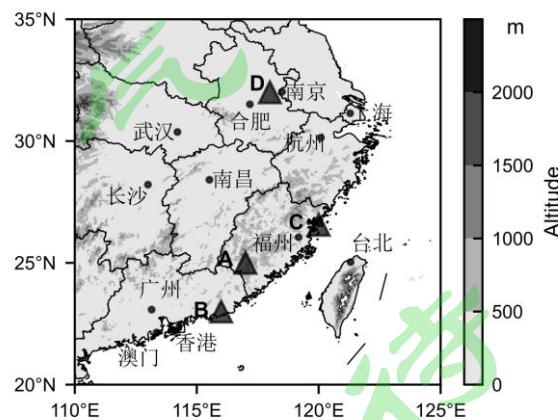
97 本文主要基于中国东部地区的龙岩、汕头、福州及马鞍山地区观测的逐小时云底高度数
98 据，观测时段为 2017-2019 年。站点信息如图 1 和表 2 所示。
99

表 2 地面观测站点信息

Table 2 Information on the observational sites for the cloud base height

观测站点	城市	海拔高度 (m)	观测时间	样本量
A	龙岩	397	2017.10-2018.08	3158
B	汕头	13.8	2018.01-2018.09	2806
C	福州	16	2018.04-2018.09	1733
D	马鞍山	0	2019.01-2019.12	3670

101



102 图 1 地面观测云底高度的站点分布。填色代表海拔高度，圆点为省会城市，三角形为地面观测站点，字
103 母为观测站点编号
104

105 Figure 1 Distribution of ground-based observational sites for the cloud base height. The shading, dots, triangles

106 and letters indicate the elevation above sea level, provincial capitals, ground-based observation sites, and numbers
107 of ground-based observation sites, respectively

108 (2) ERA5 再分析数据

109 ERA5 是欧洲中期天气预报中心给出的第五代再分析资料,包含自 1950 年以来的大气、
110 海洋和地表变量产品。相比于 ERA-interim 数据, ERA5 数据质量有所提升,而且拥有更高的
111 时空分辨率 (Hersbach et al., 2020)。本文对 2017-2019 年 ERA5 再分析资料中的云底高
112 度产品进行了评估,并给出了中国地区云底高度分布特征,所用的 ERA5 云底高度产品的时
113 间分辨率为 1 小时,空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

114 (3) 气象信息综合分析处理系统数据

115 气象信息综合分析处理系统是中国气象局自主研发的气象信息处理和天气预报制作系
116 统,是国内气象预报制作的业务平台,在天气预报及气象服务中发挥了重要作用。其中的地
117 面全要素填图数据包括地面温度、地面露点温度、风速、风向和云量等 21 个地表参量,本
118 文选取了逐 3 小时的天气实况数据,用以分析 ERA5 云底高度产品在有无降水条件下对不同
119 高度云的准确性。

120 (4) CloudSat 卫星数据

121 CloudSat 卫星搭载的 94 GHz 云廓线雷达 (Cloud Profiling Radar, CPR) 能够穿透云层,
122 探测云的垂直廓线信息,进而获取云分数、云顶高度和云底高度等云参数。本文采用的是
123 2010-2019 年间 CloudSat 和 CALIPSO 联合观测得到的 2B-GEOPROF-LIDAR 二级产品经网
124 格化后的云底高度资料,用以校验初步订正 ERA5 产品后获取的中国地区云底高度分布。

125 2.2 研究方法

126 研究中,首先以就近原则将离地面观测站点最近的 ERA5 数据格点与地面观测站点进行
127 空间匹配,再将 ERA5 数据的时间统一为北京时,使两种资料在时间序列上相对应。分别对
128 ERA5 与观测的偏差 (D) 和均方根误差 (RMSE) 进行评估,偏差和均方根误差公式如下:

$$129 D_i = X_i - x_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$130 RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^2} \quad (2)$$

131 式中, X_i 和 x_i 为与地面观测资料进行时空匹配后的 ERA5 云底高度和地面观测云底高
132 度, D_i 为 ERA5 云底高度减去地面观测云底高度的差值, N 为样本量。

133 基于 ERA5 产品和地面观测云底高度之间的小时平均偏差 \bar{D}_t , 对逐小时的 ERA5 云底
134 高度进行订正:

$$135 Y_t = X_t - \bar{D}_t \quad (t = 0, 1, \dots, 23) \quad (3)$$

136 其中, t 表示时间, X_t 为 t 时 ERA5 云底高度, Y_t 为订正后的云底高度。

137 基于对中国东部地区云底高度的订正,应用于整个中国地区,利用 CloudSat 观测资料

138 对订正后的 2010-2019 年中国地区的 ERA5 云底高度进行校验和分析。

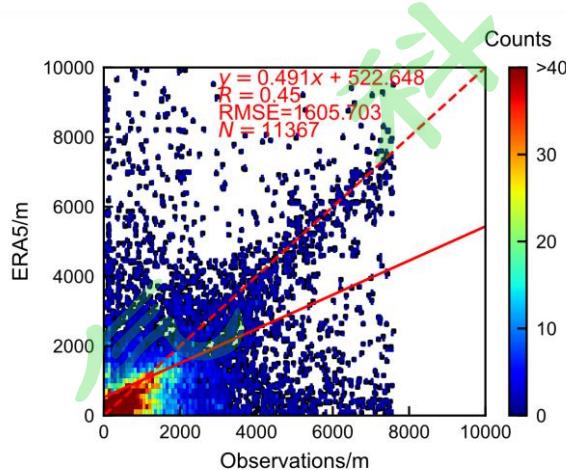
139 3 主要结果分析

140 3.1 逐小时 ERA5 云底高度的评估

141 将地面观测资料与 ERA5 资料进行时空匹配后，获得 11367 组逐小时云底高度样本。

142 ERA5 云底高度和地面观测的云底高度相关系数 (R) 为 0.45，均方根误差为 1605.70 m。图
143 2 给出的是地面观测与 ERA5 云底高度的散点图。如图 2 所示，ERA5 云底高度总体随着地
144 面观测云底高度的增加而增加。当云底高度<1000 m 时，ERA5 为高估实际云底高度，云底
145 高度>1000 m 时，ERA5 为低估实际云底高度。

146



147

148 图 2 地面观测云底高度与 ERA5 云底高度的散点图。填色表示频数，虚线为 1: 1 线，实线为地面观测的
149 云底高度与 ERA5 云底高度的拟合线，N 为样本数，R 为相关系数，RMSE 为均方根误差，y 为拟合线方程

150 Figure 2 Scatter plot of ground-based measured versus ERA5 provided cloud base heights. The shading, dashed
151 line, and solid line indicate the frequency, 1:1 line, and fitted line between ground-based observations and ERA5
152 product, respectively. N, R, RMSE, and y represent the sample number, correlation coefficient, root mean square
153 error, and fitting equation, respectively

154 基于对 ERA5 云底高度与地面观测云底高度的差异分析，进一步给出了二者的偏差频率
155 分布，如图 3 所示。分析发现，ERA5 云底高度与地面观测的云底高度偏差集中在±2000 m
156 以内。其中，ERA5 云底高度比地面观测云底高度低 0-500 m 的情况最多，占 32%；其次为
157 ERA5 云底高度高于观测云底高度 0-500 m，占比为 22%。整体而言，ERA5 与地面观测的
158 云底高度偏差大多小于 0，偏差小于 0 的总百分比为 64%，说明 ERA5 大多低估了云底高度。
159

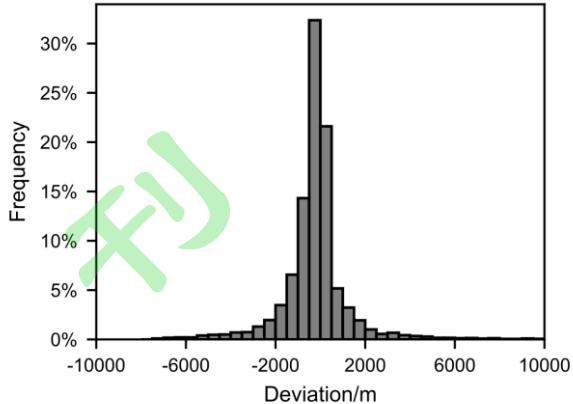


图 3 ERA5 产品与地面观测云底高的度偏差频率分布

Figure 3 Frequency distribution of ERA5 cloud base height deviation from ground-based observations

3.2 ERA5 云底高度日变化和月变化评估

对 ERA5 和地面观测的云底高度小时变化分析发现, 如图 4 所示, 0:00-9:00 云底高度随时间整体呈现降低趋势, 地面观测云底高度小时平均值最小值出现在上午 10:00, 值为 973.91 m, 而 ERA5 云底高度小时平均值最小值出现在上午 9:00, 值为 733.12 m。10:00-19:00 云底高度随时间升高, 19-22 时云底高度均相对较高, 地面观测和 ERA5 云底高度小时平均值最大值均出现在 22:00, 分别为 1842.09 m 和 1561.49 m, 22:00 后, 云底高度逐渐降低。

对比 ERA5 云底高度和地面观测云底高度日变化, 两种资料云底高度日变化趋势一致, 但平均小时偏差不同, ERA5 云底高度小时平均值除 15:00 外均低于地面观测云底高度小时平均值。ERA5 和地面观测云底高度小时平均值在 10:00-17:00 差异较小, 偏差在 ± 200 m 以内, 二者绝对偏差最小值出现在 15:00, 值为 10.18 m, 最大值出现在 6:00, 值为 -373.81 m。

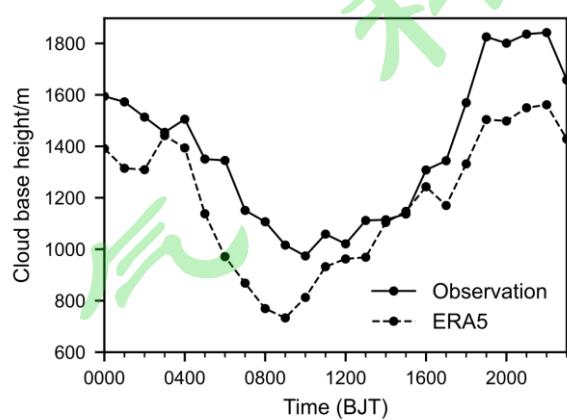
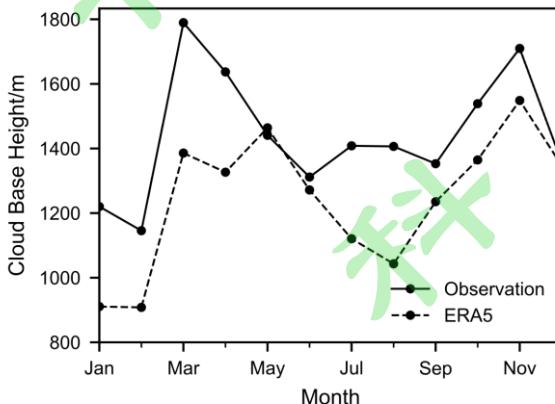


图 4 中国东部云底高度小时变化图 (m)。实线为地面观测资料, 虚线为 ERA5 再分析资料

Figure 4 Variation of hourly cloud base heights (m) over eastern China. The solid and dashed lines represent the ground-based observations and ERA5 product, respectively

云底高度月变化如图 5 所示, 地面观测云底高度季节平均值分别为春季 (3、4、5 月) 1662.45 m, 夏季 (6、7、8 月) 1375.45 m, 秋季 (9、10、11 月) 1533.82 m, 冬季 (12、1、2 月) 1240.92 m; ERA5 云底高度季节平均值分别为春季 1392.14 m, 夏季 1145.17 m, 秋季

180 1382.83 m, 冬季 1055.08 m; 两种资料云底高度季节平均值均为春季>秋季>夏季>冬季。两
181 种资料对比发现秋、冬季 ERA5 与地面观测得云底高度月变化趋于一致, 春、夏季两种资料
182 云底高度月变化差异较大。春夏季, 地面观测的云底高度月平均值 3 月最高, 6 月最低, 分
183 别为 1789.47 m 和 1311.62 m, ERA5 云底高度月平均值 5 月最高, 8 月最低, 最高为 1463.95
184 m, 最低为 1043.14 m, 二者的绝对偏差 12 月最小, 为 10.49 m, 4 月最大, 为 403.62 m。



186 图 5 中国东部云底高度月变化图 (m)。实线为地面观测资料, 虚线为 ERA5 再分析资料
187 Figure 5 Variation of monthly cloud base heights (m) over eastern China. The solid and dashed lines represent
188 ground-based observations and ERA5 product, respectively

189 3.3 ERA5 云底高度评估的统计分析

190 从前面的分析可见, 中国东部地区 ERA5 云底高度多低估地面观测云底高度, 在表 2
191 中再次印证了这一点。地面观测云底高度范围在 8000 m 以内, 平均值为 1422.16 m, ERA5
192 云底高度最高可达 15000 m 以上, 平均值为 1220.98 m。两种资料云底高度平均偏差为 -201.18
193 m, 平均绝对偏差为 907.90 m, 从平均偏差和平均绝对偏差都较小来看, ERA5 云底高度的
194 准确性较好, 但 ERA5 与地面观测的云底高度偏差的极值很大, 最小值为 -7496.06 m、最大
195 值为 14147.10 m, 说明 ERA5 云底高度产品仍有一定的不确定性。

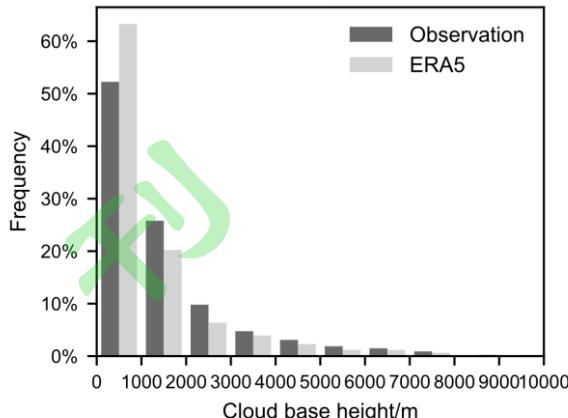
196 表 3 2017-2019 年中国东部地面观测与 ERA5 云底高度的对比

197 **Table 3 Comparison between ground-based observed and ERA5 provided cloud base heights
198 in eastern China during the period of 2017-2019**

云底高度 (m)	样本量 (N)	最小值	最大值	平均值	标准差
地面观测	11367	30.00	7597.00	1422.16	1461.18
ERA5	11367	29.47	15007.90	1220.98	1581.06
偏差	11367	-7496.06	14147.10	-201.18	1593.12
绝对偏差	11367	0.14	14147.10	907.90	1324.44

199 对两种资料云底高度频率统计 (图 6) 发现, 中国东部地区 ERA5 和地面观测云底高度
200 的频率随高度升高而降低, 其中低于 1000 m 的云底高度频率最高, 分别为 63% 和 52%, 其
201 次为 1000-2000 m, 频率为 20% 和 26%。对比两种资料云底高度频率分布, ERA5 云底高度
202 低于 1000 m 的频率高于地面观测资料, 云底高度在 1000-8000 m 的频率均低于地面观测资
203 料, 正因如此 ERA5 在整体上表现为低估地面观测的云底高度。

204

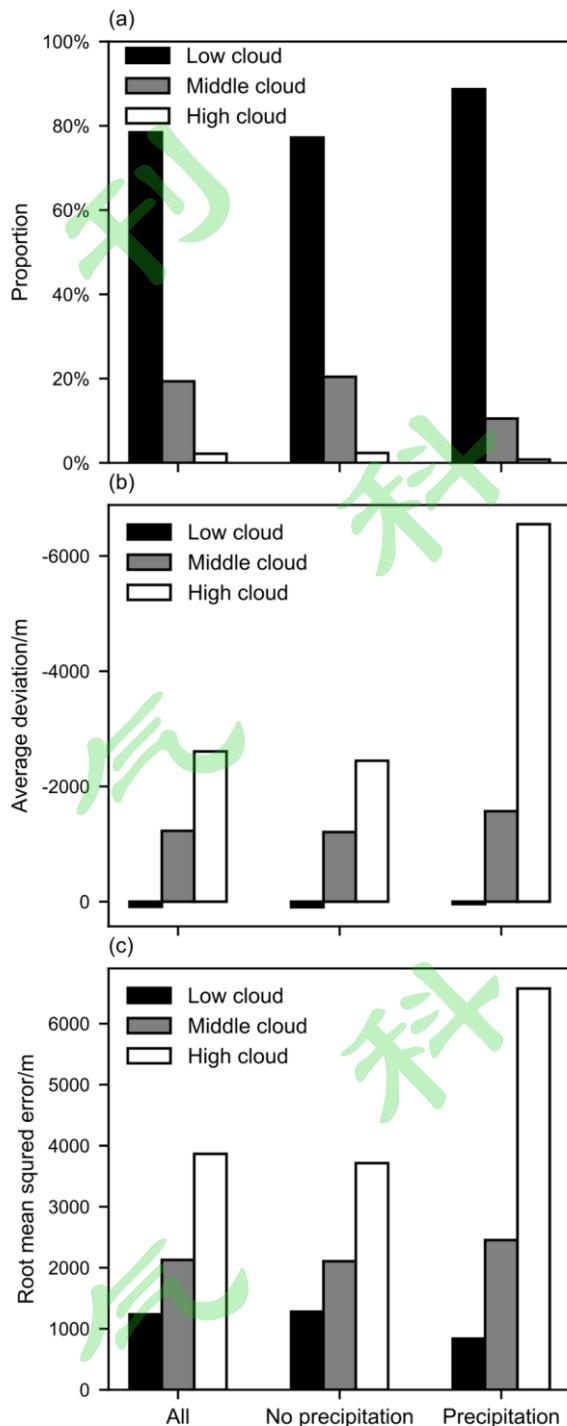


205 图 6 2017-2019 年中国东部云底高度的频率分布。浅灰色表示 ERA5 再分析资料，深灰色表示地面观测
206 资料

207 Figure 6 Frequency distribution of cloud base height. The light gray and dark gray squares indicate ERA5
208 product and ground-based observations respectively over eastern China during the period of 2017-2019

209 云和降水往往密不可分，降水的发生和强度与云的宏观微观物理特征关系紧密，Asutosh
210 等人（2021）对云底高度和降水特征的观测进行分析得出大多数强降水事件都与低云有关。
211 本文按照地面观测云底高度 0-2000 m、2000-6000 m 和 6000 m 以上，将云分为低云、中云
212 和高云，结合地面天气实况，分析了 ERA5 云底高度产品在有无降水条件下对不同高度云的
213 准确性。

214 如图 7 所示，中国东部地区以低云为主，其次为中云，高云相对较少；在有降水条件下，
215 低云的占比更高，中云和高云有所减少。对于低云来说，ERA5 和地面观测云底高度偏差大
216 于 0 且绝对值较小；对于中、高云，偏差均小于 0，高云偏差值最大。对比有无降水条件下
217 不同高度云的平均偏差和均方根误差发现，有降水时，低云偏差绝对值和均方根误差有所减
218 小，中云差绝对值和均方根误差有较小增加，但是对于高云，偏差绝对值和均方根误差明显
219 增加。说明 ERA5 云底高度和地面观测云底高度相比，高估了低云云底高度，低估了中、高
220 云云底高度，且对低云云底高度准确性较好，而中、高云云底高度偏差较大。另外，在发生
221 降水的条件下，ERA5 对低云云底高度的准确性相较于无降水条件下更高，而对中、高云云
222 底高度准确性更低，尤其是对于高云。存在较大偏差的原因之一为不同高度云在不同条件下
223 样本量的差异，如图 7 (a)，在所有样本中，低云样本量最多，中云和高云样本量较少，
224 在有降水条件下，中、高云样本量则更少，样本量的不足可能导致了中、高云云底高度误差
225 较大。



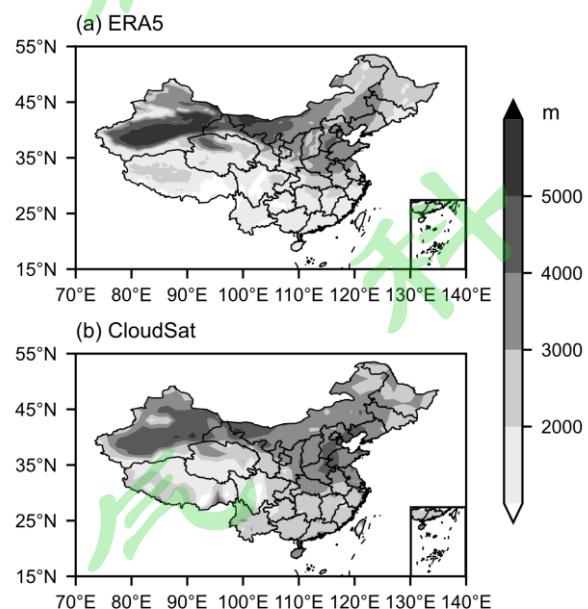
227 图 7 有无降水条件下不同高度云 (a) 占比情况 (%)、地面观测与 ERA5 云底高度的 (b) 平均偏差和
228 (c) 均方根误差 (m)。黑色代表低云，灰色代表中云，白色代表高云

229 Figure 7 The (a) percentage of clouds of different heights (%), (b) mean deviation and (c) root mean square error
230 (m) of cloud base heights derived from ground-based observations and ERA5 data under precipitation and
231 no-precipitation conditions. The black, gray, and white squares indicate low-, middle- and high-clouds,
232 respectively

233 3.4 中国地区 ERA5 云底高度订正及分布特征

234 基于对中国东部地区云底高度的订正，应用于整个中国地区，分析了 2010-2019 年中国
235 地区云底高度分布特征和季节变化，同时利用 CloudSat 卫星观测云底高度资料进行了验证。
236 需要注意的是，地面观测和 ERA5 的云底高度都是以地面为起始高度，而 CloudSat 卫星观
237 测的云底高度起始高度为海平面（王胜杰等，2010），因此，本文中 CloudSat 云底高度需
238 减去海拔高度后再与 ERA5 云底高度进行比较。

239 如图 8 所示，中国地区云底高度整体呈现自西北至东南逐渐降低的分布特征。从 ERA5
240 给出的 2010-2019 年中国云底高度分布(图 8a)可以看到，由于中国南方地区水汽充沛，云底
241 高度较低，如福建、广东、广西、云南、贵州、四川等地平均云底高度均低于 2000 m。青
242 藏高原大部分地区平均云底高度也都低于 2000 m，其东南部云底高度相对更低，部分地区
243 平均云底高度甚至低于 1000 m，但在沙漠地区如柴达木盆地平均云底高度达到 4000 m 以上。
244 同样，在中国其他沙漠地区云底高度也较高，如新疆塔克拉玛干沙漠、内蒙古西部巴丹吉林
245 沙漠和戈壁等地区平均云底高度均在 5000 m 以上。华中、华东、华北东部和东北大部分地
246 区平均云底高度变化范围在 2000-4000 m，华北东部和东北地区云底高度较低，京津冀地区
247 云底高度相对较高，其中部分地区平均云底高度可达 4000 m 以上。CloudSat 的中国地区云
248 底高度分布（图 8b）与 ERA5 类似。

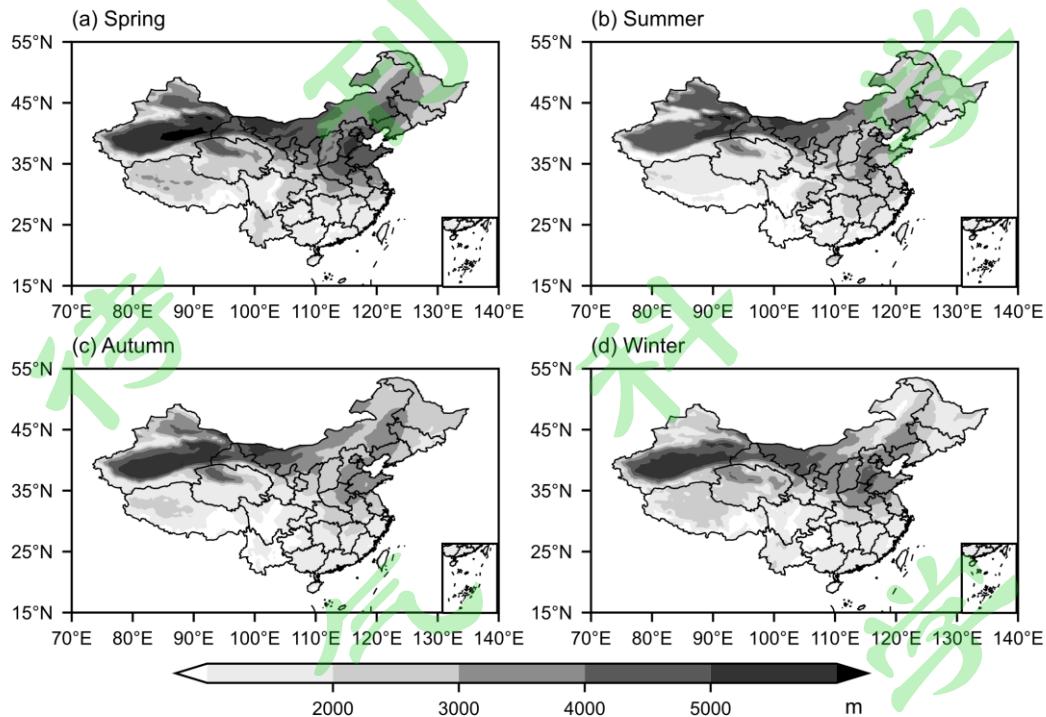


250 图 8 2010-2019 年中国地区 (a) 订正后的 ERA5 和 (b) CloudSat 观测的云底高度分布
251 Figure 8 Distribution of cloud base heights from (a) revised ERA5 data and (b) CloudSat observations in China
252 during the period 2010-2019

253 中国地区云底高度季节分布特征（图 9）与年平均分布特征类似，均为西北高，东南低，
254 不同地区具有不同季节变化。东南地区秋季云底高度较高，春、夏、冬季相对较低；青藏高
255 原春、冬季云底高度较高，秋季次之，夏季最低；新疆南部和内蒙古西部地区四季云底高度
256 都在 4000 m 以上，其中，部分地区达 6000 m 以上，四季中春季云底高度最高，秋季次之，

257 夏季和冬季较低；而新疆北部夏季云底高度最高，秋冬季节较低；中国东北部和内蒙古东部
258 地区冬季云底高度最低，春季最高，华北、华中地区云底高度春季>冬季>秋季>夏季，春季
259 京津冀地区的云底高度很高在 4000 m 以上。

260



261

图 9 2010-2019 年中国地区 ERA5 订正后的云底高度季节分布。

262

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

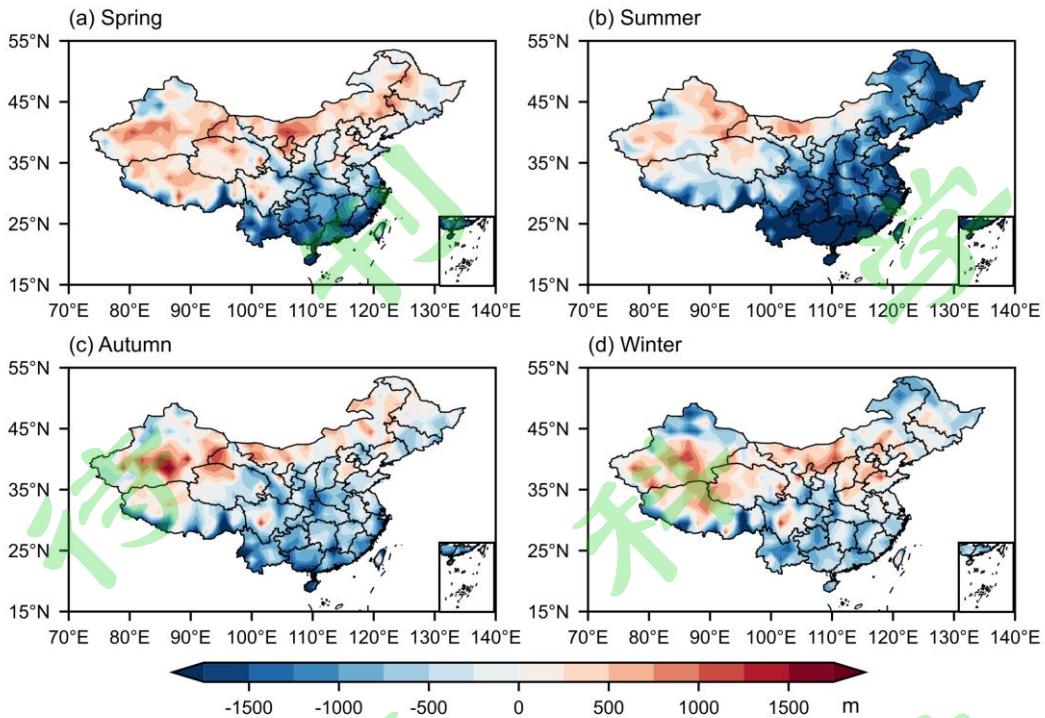
263

Figure 9 Distribution of cloud base heights based on revised ERA5 product in the (a) spring, (b) summer, (c)
264 autumn and (d) winter in China during the period 2010-2019

265

将初步订正后的 ERA5 云底高度与 CloudSat 卫星观测云底高度对比发现, ERA5 云底高
266 度季节分布与 CloudSat 云底高度季节分布有些差异。如图 10 所示, 春季, ERA5 低估了南
267 方地区云底高度, 高估了青藏高原、西北和北方地区云底高度; 夏季, ERA5 还是高估了西
268 北地区的底高度, 低估了中国其余地区云底高度, 对中国南方地区尤其是沿海地区云底高度
269 低估更多; 秋季, ERA5 对南方地区和青藏高原东南部地区云底高度略为低估, 对西北和东
270 北地区云底高度略为高估; 冬季与秋季较相似, ERA5 与 CloudSat 云底高度的偏差较小, 大
271 部分地区云底高度偏差均在 ± 1000 m 以内, 不同的是冬季 ERA5 对东北地区云底高度略低
272 估, 对河北、山西和山东等地云底高度略高估。与 Zhang 等 (2018) 利用探空资料结合相
273 对湿度阈值法获得的云底高度季节分布对比, 探空资料获得的云底高度季节分布与 CloudSat
274 云底高度季节分布类似。可见, 订正后的 ERA5 云底高度与 CloudSat 云底高度仍存在一定
275 的偏差, 其主要原因在于订正方法和两种资料时空分辨率的差异所致, 本文所用的订正方法
276 较为简单, 订正效果有限。而且 CloudSat 观测数据较少, 一天内最多只有两个时间点的数
277 据, 而 ERA5 产品的时间分辨率为小时, 时空分辨率的不统一也会造成二者云底高度存在一
278 定偏差。

279



280

图 10 2010-2019 年中国地区 ERA5 订正后的云底高度和 CloudSat 观测云底高度的偏差季节分布。
 (a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

281

282

283

Figure 10 Distribution of cloud base height deviation between the revised ERA 5 product and CloudSat observations in the (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter in China during the period 2010-2019

284

4 结论与讨论

285

286

287

本文利用中国东部地面观测云底高度对 ERA5 云底高度从整体、时间变化和有无降水条件下进行了评估, 对 ERA5 小时云底高度进行订正后分析了 2010-2019 年中国地区云底高度分布特征, 并与 CloudSat 资料进行了对比与验证, 得到的主要结论如下:

288

289

290

(1) ERA5 云底高度与地面观测云底高度相关系数为 0.45, RMSE 为 1605.70 m, 平均偏差为-201.18 m, 平均绝对偏差为 907.90 m。从整体来看, 中国东部地区 ERA5 云底高度比实际偏低, 绝大部分偏差在±2000 m 以内, 存在一定的不确定性。

291

292

293

(2) 地面观测和 ERA5 云底高度日变化特征为白天云底高度低于夜间, 峰值出现在夜间 22:00, 谷值出现在上午 9:00。两种资料云底高度均为春季>秋季>夏季>冬季。秋季和冬季 ERA5 与地面观测云底高度月变化较为一致, 春季和夏季两种资料的月变化一致性较差。

294

295

296

(3) 中国东部地区低云占比最高, ERA5 高估了低云的云底高度, 低估了中、高云云底高度, 且中、高云云底高度的偏差较大。在有降水的条件下, ERA5 数据中低云云底高度的准确性比无降水条件下的相对较高, 但中、高云云底高度的准确性却更低。

297

298

299

300

(4) 2010-2019 年中国地区云底高度呈现从西北至东南逐渐降低的分布, 不同地区季节变化不一致。南方地区、青藏高原和东北地区相对较低, 其中青藏高原夏、秋季的云底高度较低, 春、冬季较高。沙漠地区的云底高度较高, 大于 4000 m, 四季中, 春季和秋季的云底高度较高, 春季最高。京津冀地区春季云底高度较高, 其余季节较低。与 CloudSat 观

301 测云底高度相比, ERA5 低估了中国南方地区云底高度, 夏季偏差较大, 高估了西北地区云
302 底高度; 秋季和冬季, 两种资料云底高度偏差较小。

303 本文通过评估 ERA5 云底高度, 可为 ERA5 云底高度产品的不确定性提供参考, 以便使
304 用, 并给出了中国地区云底高度呈西高东低的分布特征, 但还缺乏以高云为主的西北地区云
305 底高度观测数据进行更全面的评估。另外, 本文对 ERA5 云底高度数据仅进行了简单订正,
306 由于样本量不充足和订正方法较简单, 订正结果仍有一定不确定性, 未来工作中需进一步扩
307 充样本量、改进订正方法, 以实现更好的订正效果。

308 参考文献 (References)

- 309 Asutosh A, Chatterjee S, Subeesh M P, et al. 2021. Observation of cloud base height and
310 precipitation characteristics at a polar site Ny-Ålesund, svalbard using ground-based remote
311 sensing and model reanalysis [J]. *Remote Sens.*, 13(14): 2808. doi:[10.3390/rs13142808](https://doi.org/10.3390/rs13142808)
- 312 Cao X, Lu G, Li M, et al. 2021. Statistical characteristics of cloud heights over Lanzhou, China
313 from multiple years of micro-pulse lidar observation [J]. *Atmosphere*, 12(11): 1415.
314 doi:[10.3390/atmos12111415](https://doi.org/10.3390/atmos12111415)
- 315 Ellrod G P, Gultepe I. 2007. Inferring low cloud base heights at night for aviation using satellite
316 infrared and surface temperature data [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 164(6-7): 1193-1205.
317 doi:[10.1007/s00024-007-0214-7](https://doi.org/10.1007/s00024-007-0214-7)
- 318 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quart. J. Roy.
319 Meteor. Soc.*, 146(730): 1999-2049. doi:[10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803)
- 320 Hutchison K, Wong E, Ou S C. 2006. Cloud base heights retrieved during night-time conditions
321 with MODIS data [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 27(14): 2847-2862.
322 doi:[10.1080/01431160500296800](https://doi.org/10.1080/01431160500296800)
- 323 Jiménez P A, McCandless T. 2021. Exploring the potential of statistical modeling to retrieve the
324 cloud base height from geostationary satellites: Applications to the ABI sensor on board of
325 the GOES-R satellite series [J]. *Remote Sens.*, 13(3): 375. doi:[10.3390/rs13030375](https://doi.org/10.3390/rs13030375)
- 326 Kassianov E, Long C N, Christy J. 2005. Cloud-base-height estimation from paired ground-based
327 hemispherical observations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 44(8): 1221-1233. doi:[10.1175/JAM2277.1](https://doi.org/10.1175/JAM2277.1)
- 328 Kato S, Rose F G, Sun-Mack S, et al. 2011. Improvements of top-of-atmosphere and surface
329 irradiance computations with CALIPSO-, CloudSat-, and MODIS-derived cloud and aerosol
330 properties [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D19209. doi:[10.1029/2011JD016050](https://doi.org/10.1029/2011JD016050)
- 331 Kuhn P, Wirtz M, Killius N, et al. 2018. Benchmarking three low-cost, low-maintenance cloud
332 height measurement systems and ECMWF cloud heights against a ceilometer [J]. *Sol. Energy*,
333 168: 140-152. doi:[10.1016/j.solener.2018.02.050](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.050)
- 334 Kuji M, Nakajima T. 2002. Retrieval of cloud geometrical parameters using remote sensing data

- 335 [C]. Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds II, 4150: 225-234.
336 doi:[10.1117/12.416961](https://doi.org/10.1117/12.416961)
- 337 Lei Y, Letu H, Shang H et al. 2020. Cloud cover over the Tibetan Plateau and eastern China: A
338 comparison of ERA5 and ERA-Interim with satellite observations [J]. Climate Dyn., 54(5-6):
339 2941-2957. doi:[10.1007/s00382-020-05149-x](https://doi.org/10.1007/s00382-020-05149-x)
- 340 Li Z, Wang Y, Guo J, et al. 2019. East Asian study of tropospheric aerosols and their impact on
341 regional clouds, precipitation, and climate (EAST-AIR_{CPC}) [J]. J. Geophys. Res.: Atmos.,
342 124(23): 13026-13054. doi:[10.1029/2019JD030758](https://doi.org/10.1029/2019JD030758)
- 343 Miao H, Wang X, Liu Y, et al. 2019. An evaluation of cloud vertical structure in three reanalyses
344 against CloudSat/cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations [J]. Atmos.
345 Sci. Lett., 20(7): e906. doi:[10.1002/asl.906](https://doi.org/10.1002/asl.906)
- 346 Mitchell D L, Finnegan W. 2009. Modification of cirrus clouds to reduce global warming [J].
347 Environ. Res. Lett., 4(4): 549-567. doi:[10.1088/1748-9326/4/4/045102](https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045102)
- 348 Nazaryan H, McCormick M P, Menzel W P. 2008. Global characterization of cirrus clouds using
349 CALIPSO data [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 113: D16211. doi:[10.1029/2007JD009481](https://doi.org/10.1029/2007JD009481)
- 350 Pan Z, Gong W, Mao F, et al. 2015. Macrophysical and optical properties of clouds over East Asia
351 measured by CALIPSO [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 120(22): 11653-11668.
352 doi:[10.1002/2015JD023735](https://doi.org/10.1002/2015JD023735)
- 353 Prein A F, Langhans W, Fosser G, et al. 2015. A review on regional convection-permitting climate
354 modeling: Demonstrations, prospects, and challenges [J]. Rev. Geophys., 53(2): 323-361.
355 doi:[10.1002/2014RG000475](https://doi.org/10.1002/2014RG000475)
- 356 Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. 1989. Cloud-radiative forcing and climate: Results
357 from the Earth radiation budget experiment [J]. Science, 243(4887): 57-63.
358 doi:[10.1126/science.243.4887.57](https://doi.org/10.1126/science.243.4887.57)
- 359 Ramon J, Lledó L, Torralba V, et al. 2019. What global reanalysis best represents near-surface
360 winds? [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 145(724): 3236-3251. doi:[10.1002/qj.3616](https://doi.org/10.1002/qj.3616)
- 361 Sharma S K, Kumar P, Vaishnav R, et al. 2016. Evaluation of clouds simulated by a weather
362 model over western India [J]. Remote Sens. Lett., 7(9): 905-913.
363 doi:[10.1080/2150704X.2016.1195934](https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1195934)
- 364 Stephens G L, Li J, Wild M, et al. 2012. An update on Earth's energy balance in light of the latest
365 global observations [J]. Nature Geosci., 5(10): 691-696. doi:[10.1038/ngeo1580](https://doi.org/10.1038/ngeo1580)
- 366 Viúdez-Mora A, Costa-Surós M, Calbó J, et al. 2014. Modeling atmospheric longwave radiation at
367 the surface during overcast skies: The role of cloud base height [J]. J. Geophys. Res.: Atmos.,
368 120(1): 199-214. doi:[10.1002/2014JD022310](https://doi.org/10.1002/2014JD022310)

- 369 王胜杰, 何文英, 陈洪滨, 等. 2010. 利用 CloudSat 资料分析青藏高原、高原南坡及南亚季风
370 区云高度的统计特征量 [J]. 高原气象, 29(1): 1-9. Wang Shengjie, He Wenqing, Chen
371 Hongbing, et al. 2010. Statistics of cloud height over the Tibetan Plateau and its surrounding
372 region derived from the CloudSat data [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29(1): 1-9.
- 373 Welch R M, Asefi S, Zeng J, et al. 2008. Biogeography of tropical montane cloud forests. Part I:
374 Remote sensing of cloud-base heights [J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47(4): 960-975.
375 doi:[10.1175/2007JAMC1668.1](https://doi.org/10.1175/2007JAMC1668.1)
- 376 杨宁, 雍蓉, 范梵, 等. 2009. K/LLX503 型机场激光测云雷达 [J]. 气象水文装备, 20(6):
377 45-46. Yang Ning, Yong Rong, Fan Fan, et al. 2009. K/LLX503 laser cloud profiling radar [J].
378 Meteorological and Hydrological Equipments (in Chinese), 20(6): 45-46.
- 379 You Q, Jiao Y, Lin H, et al. 2014. Comparison of NCEP/NCAR and ERA-40 total cloud cover
380 with surface observations over the Tibetan Plateau [J]. *Int. J. Climatol.*, 34(8): 2529-2537.
381 doi:[10.1002/joc.3852](https://doi.org/10.1002/joc.3852)
- 382 Zhang L, Dong X, Kennedy A, et al. 2017. Evaluation of NASA GISS post-CMIP5 single column
383 model simulated clouds and precipitation using ARM Southern Great Plains observations [J].
384 *Adv. Atmos. Sci.*, 34(3): 306-320. doi:[10.1007/s00376-016-5254-4](https://doi.org/10.1007/s00376-016-5254-4)
- 385 Zhang Y, Zhang L, Guo J, et al. 2018. Climatology of cloud-base height from long-term
386 radiosonde measurements in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 35(2): 158-168.
387 doi:[10.1007/s00376-017-7096-0](https://doi.org/10.1007/s00376-017-7096-0)
- 388 Zhang Y, Zhou Q, Lv S, et al. 2019. Elucidating cloud vertical structures based on three-year
389 Ka-band cloud radar observations from Beijing, China [J]. *Atmos. Res.*, 222: 88-99.
390 doi:[10.1016/j.atmosres.2019.02.007](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.02.007)
- 391 Zhou C, Zelinka M D, Klein S A. 2016. Impact of decadal cloud variations on the Earth's energy
392 budget [J]. *Nature Geosci.*, 9(12): 871-874. doi:[10.1038/ngeo2828](https://doi.org/10.1038/ngeo2828)